

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**TECHNICAL SCIENCES**

УДК 536.248.2

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-2-234-240>

Поступило в редакцию 02.03.2021

Received 02.03.2021

О. Л. Войтик, К. И. Делендик, Н. В. Коляго*Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***КОНСТРУКЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГРАВИТАЦИОННО-
НЕЗАВИСИМЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ***(Представлено академиком О. Г. Пенязьковым)*

Аннотация. Созданы серии тепловых труб с сетчатыми фитилями (теплоноситель – вода, корпус – медная трубка). Разработаны фитили из сеток различного переплетения (полотняного, саржевого, перевивочного и петельного) с улучшенными гидрофильными свойствами и вторичной капиллярной структурой. Тепловые трубы гравитационно независимы, приспособлены для работы в различных условиях ориентации и локализации, обеспечивают передачу тепловых потоков значительной плотности (до 25 Вт/см²). Отличительные свойства разработанных тепловых труб по сравнению с традиционными, оснащенными порошковыми фитилями: высокие эксплуатационные характеристики, устойчивость к глубокой заморозке, вибростойкость.

Ключевые слова: тепловая труба, фитиль, тепловое сопротивление, доза заправки, максимальная теплопередающая мощность

Для цитирования. Войтик, О. Л. Конструкционные решения для создания гравитационно-независимых тепловых труб / О. Л. Войтик, К. И. Делендик, Н. В. Коляго // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 2. – С. 234–240. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-2-234-240>

Olga L. Voitik, Kirill I. Delendik, Natalia V. Kolyago*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***DESIGN SOLUTIONS FOR GRAVITY-INDEPENDENT HEAT PIPES***(Communicated by Academician Oleg G. Penyazkov)*

Abstract. Heat pipes with mesh wicks were designed (working liquid – water, envelope – copper tube). Wicks from the mesh of various weaves (plain, twill, leno and looped) with improved hydrophilic properties and secondary capillary structure were developed. Heat pipes are gravity-independent, adapted to work in various conditions of orientation and localization, and provide the transfer of high heat flux powers (up to 25 W/cm²). The peculiar properties of the developed heat pipes in contrast to the traditional heat pipes (with powder wicks) are: high performance characteristics, resistance to deep freezing; vibrostability.

Keywords: heat pipe, wick, thermal resistance, charging dose, maximum heat flux

For citation. Voitik O. L., Delendik K. I., Kolyago N. V. Design solutions for gravity-independent heat pipes. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 2, pp. 234–240 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-2-234-240>

Введение. Ключевая часть современного электронного устройства – его система охлаждения. Проектировщики сталкиваются с проблемой обеспечения теплового режима мощных процессоров с высоким тепловым потоком в ограниченном пространстве. Необходимо одновременно увеличивать коэффициент теплоотдачи и развивать площадь теплообменной поверхности, что позволит минимизировать тепловое сопротивление системы охлаждения в целом. Но излишнее увеличение площади поверхности теплообмена приводит к резкому увеличению габаритов и массы системы охлаждения, повышению гидродинамических потерь и увеличению теплового

сопротивления. Компактность оборудования уменьшает коэффициенты теплоотдачи и также увеличивает тепловое сопротивление. Жесткие требования к массогабаритным характеристикам системы охлаждения ограничивают применение традиционных способов отвода тепла от труднодоступных элементов электронных схем. Увеличение рабочей температуры устройства на 10 °С уменьшает вдвое его срок службы [1].

Для решения проблем термостабилизации успешно применяются испарительно-конденсационные устройства, в частности тепловые трубы. Тепловая труба – испарительно-конденсационное устройство, служащее для отвода тепловых нагрузок от труднодоступных теплонапряженных элементов при малых градиентах температуры и работающее по замкнутому циклу. Тепловая труба состоит из рабочей жидкости, корпуса, фитиля. Отсутствие в конструкциях тепловых труб движущихся механических частей, использование для движения рабочей жидкости капиллярных сил, высокая плотность передаваемого теплового потока при минимальных перепадах температур, минимальное обслуживание и малый удельный вес, бесшумная работа создают им преимущества и обеспечивают надежность и долговечность перед иными способами термостабилизации элементов электроники. С каждым годом к тепловым трубам возрастают предъявляемые требования по максимальному передаваемому тепловому потоку и способности работать при любой ориентации. Существующие промышленно выпускаемые тепловые трубы перестают удовлетворять запросам. Интенсификация теплообмена и повышение эффективности тепловых труб наиболее актуальны и требуют проведения комплекса научно-исследовательских работ, связанных с созданием эффективных капиллярно-пористых структур и конструкций тепловых труб [2–6]. Цель данной работы – создание гравитационно независимой тепловой трубы с высокой теплопередающей способностью в широком диапазоне тепловых нагрузок.

Конструкция тепловой трубы. В качестве рабочей жидкости выбрана вода благодаря высоким значениям скрытой теплоты парообразования и поверхностного натяжения, малой стоимости, доступности, безопасности для человека и окружающей среды.

В качестве материала корпуса выбрана медь, что обусловлено высокой теплопроводностью материала, возможностью выдерживать перепад давлений между внутренней полостью корпуса и окружающей средой, технологичностью (свариваемость, простота механической обработки, пластичность), смачиваемостью. Зона испарения корпуса была наноструктурирована для создания зародышей парообразования при минимальных перегревах теплонагруженной поверхности, что интенсифицировало теплообмен и привело к уменьшению термического сопротивления тепловой трубы на 8–13 %.

Фитили используются для перемещения жидкости из конденсатора в испаритель, обеспечения необходимого распределения жидкости по всей зоне испарения. Особенности строения фитиля обуславливаются структурными параметрами, которые оказывают непосредственное влияние на процессы, протекающие в тепловой трубе, и определяют капиллярно-транспортные (пористость, капиллярное давление, проницаемость) и теплофизические свойства фитиля (теплопроводность, термическое сопротивление). В [7] проанализированы преимущества и недостатки фитилей с различной капиллярной структурой.

Выбор конструкции тепловой трубы определялся из ограничений по передаваемой мощности: вязкостное ограничение связано с возрастанием сил вязкости в паровом потоке при понижении температуры; капиллярное – с предельной перекачивающей способностью капиллярной структуры; звуковой предел – с запирающим парового потока в паровом канале; ограничение по уносу – уносом (срывом) капель жидкости с межфазной границы жидкость–пар фитиля паром, который движется с большей скоростью, чем жидкая пленка; ограничение по кипению – разрушением потока жидкости пузырьковым кипением в фитиле. Алгоритм расчета передаваемой мощности тепловых труб реализован в математической среде MathCad [2]. Основным в рабочем диапазоне температур является капиллярное ограничение, связанное с транспортными возможностями пористой структуры фитиля.

Разработка фитиля. Хорошей технологичностью при изготовлении и высокой надежностью в работе обладает тепловая труба с фитилем в виде свернутого в трубку сетчатого экрана. Гидравлическое сопротивление в нем можно регулировать, изменяя плотность скрутки, что обеспечивает гибкость конструкции. Общий диаметр скрученного фитиля был на 0,3 мм меньше

внутреннего диаметра тепловой трубы; под действием остаточного напряжения в свернутом плотне сетки фитиль при удалении намоточного стержня прижимался к стенке. Применение для формирования системы пароотводных каналов из сетки с более крупными ячейками позволяет при сохранении жесткости конструкции уменьшить термическое сопротивление тепловой трубы.

Для увеличения максимального достижимого капиллярного давления разработаны методы нанесения покрытий с контролируемыми свойствами смачивания (рис. 1). Уникальные морфологии и высокая поверхностная энергия наноструктур CuO позволили достигнуть гидрофильности фитиля без увеличения теплового сопротивления.

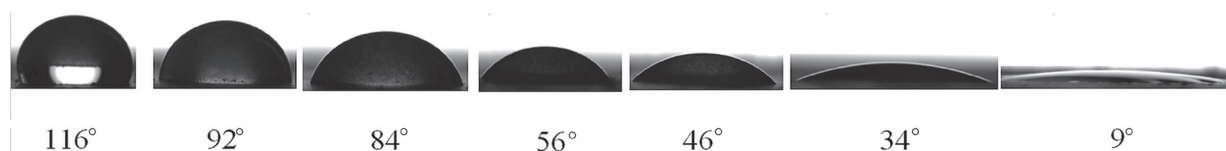


Рис. 1. Медные поверхности с контролируемыми свойствами смачивания

Fig. 1. Copper surfaces with controlled wetting properties

Разработанные методы позволяют создавать фитили со вторичной пористостью. Небольшие поверхностные поры обеспечивают высокое капиллярное давление, а крупные внутренние поры – высокую проницаемость рабочей жидкости из конденсатора в испаритель (рис. 2). Капиллярный напор, развиваемый фитилем, увеличивается с уменьшением размеров пор, но при этом проницаемость фитиля уменьшается. Оптимальный с точки зрения удовлетворения этих противоположных требований размер пор определяется параметром капиллярного насоса (отношение проницаемости фитиля K к эффективному капиллярному радиусу r_{eff}), который учитывает как капиллярную, так и транспортную составляющие. Наилучшим является фитиль с максимальным значением отношения K / r_{eff} .

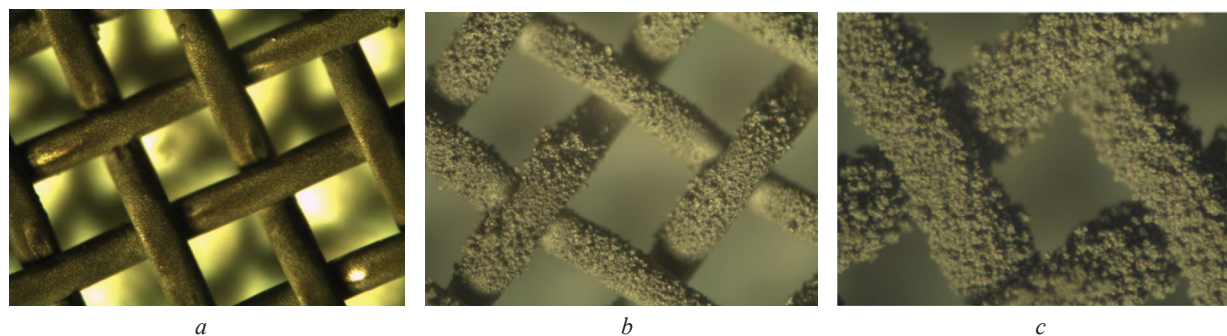


Рис. 2. Сетчатые фитили: $a - K / r_{\text{eff}} = 1,5$ мкм; $b - K / r_{\text{eff}} = 2,8$ мкм; $c - K / r_{\text{eff}} = 3,9$ мкм.

Исходная сетка 12Х18Н9Т, 70 меш, $K / r_{\text{eff}} = 0,78$ мкм

Fig. 2. Mesh wicks: $a - K / r_{\text{eff}} = 1,5$ μm ; $b - K / r_{\text{eff}} = 2,8$ μm ; $c - K / r_{\text{eff}} = 3,9$ μm .

Initial mesh 321S51, 70 mesh, $K / r_{\text{eff}} = 0,78$ μm

Разработаны и реализованы методики определения основных капиллярно-пористых характеристик: пористости, капиллярного давления, проницаемости, параметра капиллярного напора. Пористость определяли двумя способами: прямой метод измерения (обработка фотографий) и косвенный метод (весовой). Прямой метод измерения предназначен для определения объема пор путем анализа изображения и расчета пористости ε как отношения объема пор к общему объему образца. Этот метод является быстрым, но подвержен человеческому фактору и ошибкам измерения при различных размерах пор. Второй метод предназначен для определения пористости путем взвешивания. Этот метод измеряет изменение объема при погружении образца в жидкость. Измеряется масса чистого и сухого образца; насыщенного образца водой в воздухе; погруженного в воду образца. Была изучена кинетика капиллярного впитывания фитилей раз-

личных переплетений (рис. 3). Эксперимент считался завершенным, когда с течением времени уровень жидкости в фитиле не изменялся. В результате обработки изображений перемещения фронта жидкости во время капиллярного подъема получено распределение скорости пропитки по длине фитилей (путем графического дифференцирования кривых кинетики впитывания). Используя уравнения Дарси и Вошбурна определялись параметр капиллярного напора и проницаемость фитиля.

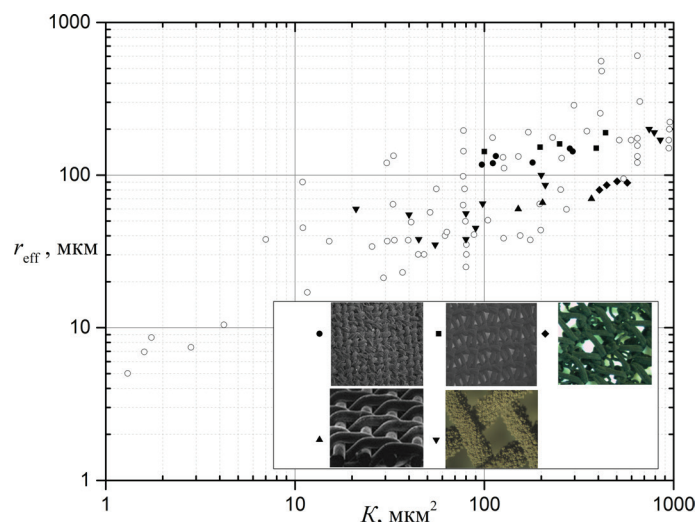


Рис. 3. Сравнение фитилей в зависимости от проницаемости и среднего эффективного капиллярного радиуса пор: закрашенные точки – сетчатые фитили различного переплетения, разработанные в Институте тепло- и массообмена НАН Беларуси, незакрашенные точки – [8]

Fig. 3. Comparison of wicks depending on permeability and average effective capillary radius of the pores: filled points – mesh wicks of various weaves, developed at HMTI, open points – [8]

Разработка тепловых труб. Главные этапы изготовления тепловой трубы: изготовление деталей, промывка, очистка, сборка, откачка и заливка, герметизация.

При изготовлении тепловой трубы тщательно были очищены корпус, фитиль, заливная труба от посторонних примесей и загрязнений: обезжиривание в кипящем изопропиловом спирте, ультразвуковая отмычка, активирующее декапирование в растворе NH_4OH для устранения окислов с поверхности, промывка в дистиллированной воде. Обезгаживание элементов осуществлялось нагревом до $300\text{ }^\circ\text{C}$ в вакууме. Учитывая влияние межоперационного хранения элементов на краевой угол смачивания и влияние угла смачивания на эксплуатационные характеристики тепловой трубы, изготовленные части сразу были использованы в сборке готового изделия без хранения.

Была разработана технология пайки тепловой трубы для предотвращения впитывания расплавленного припоя в капиллярно-пористую структуру фитиля и сохранения открытой пористости. Для минимизации утечек теплоносителя качество шва проверялось на герметичность.

Перед заправкой тепловой трубы ее откачивали с помощью вакуумного насоса при повышенных температурах для удаления адсорбированных газов.

Откачка и заправка являются двумя взаимосвязанными процессами. В ходе работ были реализованы несколько способов откачки и заправки тепловой трубы. Для заправки использовалась разработанная специальная оснастка. Предварительно вода дегазировалась в разреженной атмосфере до получения высокой степени ее чистоты. Наиболее простой способ заполнения тепловой трубы рабочей жидкостью включает подачу жидкости с избытком в вертикально расположенную тепловую трубу, вытеснение атмосферного воздуха и удаление излишков рабочей жидкости. Недостатком данного способа является неполнота пропитки сетчатого фитиля рабочей жидкостью, сохранение остаточных газов в мелких порах, что приводит к нестабильности работы тепловой трубы при последующем выделении остаточных газов. Другой способ заполнения

тепловой трубы включает подачу рабочей жидкости с избытком в наклонно установленную тепловую трубу, приводимую во вращение, и насыщение капиллярно-пористой структуры теплоносителем за счет центробежных сил, возникающих при вращении. Применение данного способа показало наличие остаточных газов как и в предыдущем способе. Следующий разработанный способ заполнения тепловой трубы включал вакуумирование тепловой трубы и подачу в нее рабочей жидкости в виде известного количества сухого насыщенного пара. Недостатком данного способа также является неполнота насыщения фитиля, так как при конденсации пара в порах резко падает давление и снижается проникающая способность жидкости. Процесс насыщения фитиля рабочей жидкостью – процесс небыстрый, требующий стабильного давления, поэтому в результате падения давления не достигается полнота пропитки и вытеснение остаточных газовых примесей, что приводит к нестабильности работы тепловой трубы и недостижению ее предельных параметров. В итоге исследований был выбран способ, который включает предварительную вакуумную дегазацию, заполнение тепловых труб рабочей жидкостью с избытком, пропитывание фитиля в течение определенного времени при температуре кипения рабочей жидкости. Метод выпаривания жидкости позволяет точно дозировать объем заправляемого теплоносителя.

Герметизация тепловой трубы включала следующие операции: закупорка специальной заправочной трубки – штенгеля с последующей обрезкой и пайкой (рис. 4).



Рис. 4. Внешний вид разработанной тепловой трубы (диаметр 10 мм, длина 270 мм)

Fig. 4. View of the developed heat pipe (diameter 10 mm, length 270 mm)

Было изготовлено несколько серий тепловых труб. Проведены комплексные исследования в широком диапазоне параметров: конструктивных (тип фитиля, доза заправки теплоносителя, капиллярно-пористая структура), режимных (ориентация в пространстве, температура теплоносителя, тепловая нагрузка при воздушном и водяном охлаждении). Изучены режимы работы: стационарные, пусковые и переходные. Для достоверности опытных данных проводилось не менее трех серий экспериментов для каждой трубки. Полученный разброс параметров тепловых труб одинаковой конструкции в среднем не превышал $\pm 10\text{--}15\%$.

Максимальная теплопередающая способность определялась по резкому увеличению угла наклона в зависимости подводимой мощности от перепада температур по трубе (резкий скачок температуры между термопарами либо рост температуры без установления стационарного состояния) (таблица).

Сравнение тепловых труб диаметром 8–10 мм*

Comparison of 8–10 mm* dia heat pipes

Компания Company	Максимальная передаваемая мощность, Вт Maximum transferred power, W
ИТМО НАН Беларуси	65–89
European Thermodynamics Ltd. (Великобритания)	32–85
Quick-Ohm K�pper & Co. (Германия)	50–65
CCI (Тайвань)	65–70
Wakefield-Vette (США)	25–120

П р и м е ч а н и е. * – данные взяты с официальных веб-страниц компаний.

N o t e. * – data of the official web-pages of companies.

Тепловые трубы с фитилями без вторичной пористости были гравитационно зависимы (термические сопротивления отличались более 20 % при противоположных ориентациях в пространстве). Модификация поверхности сеток позволила не только улучшить гидрофильные

свойства фитиля, но и создали вторичную капиллярную структуру с более мелкими порами, что позволило создать гравитационно независимые тепловые трубы.

Тепловые трубы с сетками саржевого переплетения показали лучшие теплофизические характеристики (13100–18300 Вт/(м·К)), чем тепловые трубы с сетками полотняного переплетения (7500–8800 Вт/(м·К)). Как показали первоначальные результаты исследований, для фиксации фитиля на стенке не достаточно было сил упругости сетки: при повышенных температурах происходило отставание фитиля от стенки по мере образования пузырей в зоне нагрева. Для обеспечения физического контакта между слоями фитиля и стенкой трубы использовалась спиральная пружина, диаметр витков которой был несколько больше диаметра парового канала трубы, либо упругая металлическая сетка с более крупными ячейками. С улучшением теплового контакта трубы показали стабильную работу при любой ориентации, ухудшение характеристик не превышало 15 % (термическое сопротивление при расположении испарителя выше конденсатора 0,11 К/Вт, а в противоположной ориентации – 0,13 К/Вт).

Перспективны тепловые трубы с фитилями перевивочного и петельного переплетения в сочетании с сеткой саржевого переплетения для обеспечения теплового контакта. Данные трубы способны передавать большие мощности (до 135 Вт), но при этом увеличивалось и термическое сопротивление тепловой трубы (до 0,3–0,56 К/Вт). При расположении испарителя выше конденсатора ухудшение характеристик не превышало 6 % по сравнению с ориентацией «термосифона».

Были исследованы трубы с различной дозой заправки в диапазоне: номинальная доза (степень заправки, при которой отсутствует избыток теплоносителя, а фитиль полностью насыщен жидкостью, а паровой канал – паром) ± 35 % с шагом 5 %. Недолив приводил к уменьшению передаваемой мощности вплоть до полной потери работоспособности (осушение испарительной зоны). Избыток жидкости блокировал конденсатор, возникал существенный перепад температур вдоль трубы, увеличивалось термическое сопротивление. Оптимальная доза рабочей жидкости в широком диапазоне передаваемой мощности составляет 105–120 % от насыщения фитиля. С увеличением объема заправки до определенного предела максимальная теплопередающая способность возрастает, а с уменьшением – снижается термическое сопротивление.

Успешно проведены испытания на надежность: термоциклирование, запуск из состояния с замороженным теплоносителем, испытания на вибрацию, испытания после выдержки в печи при температуре 150 °С. После испытаний образцы успешно прошли тестирование теплотехнических характеристик (относительная погрешность не более 10,9 % при доверительной вероятности 0,95). Трубы не имели деформаций и других нежелательных дефектов ни снаружи, ни внутри (трубы после цикла испытаний вскрывались для проверки целостности капиллярно-пористой структуры). Замораживание теплоносителя не привело к разрушению сетчатого фитиля, в отличие от фитилей из спеченного порошка.

Заключение. В Институте созданы конкурентоспособные тепловые трубы с сетчатыми фитилями. Разработаны фитили из сеток различного переплетения (полотняного, саржевого, перевивочного и петельного) с улучшенными гидрофильными свойствами и вторичной капиллярной структурой. Тепловые трубы приспособлены для работы в различных условиях ориентации и локализации, обеспечивают передачу тепловых потоков значительной плотности (до 25 Вт/см²). Отличительные свойства разработанных тепловых труб по сравнению с традиционными, оснащенными порошковыми фитилями: высокие эксплуатационные характеристики, устойчивость к глубокой заморозке, вибростойкость. Себестоимость одной тепловой трубы составила 9–12 у. е.

Сотрудники Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси имеют значительный опыт в создании устройств с испарительно-конденсационным циклом, в разработке полностью интегрированного решения теплового регулирования от первой концепции до дизайна продукции и производства. Все наукоемкие компоненты изготавливаются на базе Института.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность академику О. Г. Пенязкову за поддержку.

Acknowledgments. Authors thanks to academician O. G. Penyazkov for assistance.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Cengel, Y. A. Heat transfer: a practical approach / Y. A. Cengel. – McGraw-Hill, 2003. – 932 p.
2. Development of heat pipes for cooling thermally stressed electronics elements / K. I. Delendik [et al.] // J. Eng. Phys. Thermophys. – 2019. – Vol. 92, N 6. – P. 1529–1536. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-02073-8>
3. Blet, N. Heats pipes for temperature homogenization: A literature review / N. Blet, S. Lips, V. Sartre // Appl. Therm. Eng. – 2017. – Vol. 118. – P. 490–509. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.009>
4. Heat utilisation technologies: A critical review of heat pipes / C. W. Chan [et al.] // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2015. – Vol. 50. – P. 615–627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.028>
5. Heat pipe based systems – Advances and applications / H. Jouhara [et al.] // Energy. – 2017. – Vol. 128, N 1. – P. 729–754. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.028>
6. A review of small heat pipes for electronics / X. Chen [et al.] // Appl. Therm. Eng. – 2016. – Vol. 96. – P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.048>
7. Пока горит смартфон... современные тенденции в охлаждении смартфонов / К. Делендик [и др.] // Наука и инновации. – 2020. – № 4. – С. 58–67.
8. Williams, R. R. Cross-plane and in-plane porous properties measurements of thin metal felts: applications in heat pipes / R. R. Williams, D. K. Harris // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2003. – Vol. 27, N 3. – P. 227–235. [https://doi.org/10.1016/s0894-1777\(02\)00223-6](https://doi.org/10.1016/s0894-1777(02)00223-6)

References

1. Cengel Y. A. *Heat transfer: a practical approach*. McGraw-Hill, 2003. 932 p.
2. Delendik K. I., Kolyago N. V., Penyzkov O. G., Voitik O. L. Development of heat pipes for cooling thermally stressed electronics elements. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 6, pp. 1529–1536. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-02073-8>
3. Blet N., Lips S., Sartre V. Heats pipes for temperature homogenization: A literature review. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 118, pp. 490–509. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.009>
4. Chan C. W., Siqueiros E., Ling-Chin J., Royapoor M., Roskilly A. P. Heat utilisation technologies: A critical review of heat pipes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 50, pp. 615–627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.028>
5. Jouhara H., Chauhan A., Nannou T., Almahmoud S., Delpech B., Wrobel L. C. Heat pipe based systems – Advances and applications. *Energy*, 2017, vol. 128, no. 1, pp. 729–754. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.028>
6. Chen X., Ye H., Fan X., Ren T., Zhang G. A review of small heat pipes for electronics. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 96, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.048>
7. Delendik K., Voitik O., Kolyago N., Penyzkov O. While the smartphone is on... current trends in smartphone cooling. *Nauka i innovacii = Science and Innovations*, 2020, no. 4, pp. 58–67 (in Russian).
8. Williams R. R., Harris D. K. Cross-plane and in-plane porous properties measurements of thin metal felts: applications in heat pipes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, vol. 27, no. 3, pp. 227–235. [https://doi.org/10.1016/s0894-1777\(02\)00223-6](https://doi.org/10.1016/s0894-1777(02)00223-6)

Информация об авторах

Войтик Ольга Леонидовна – ст. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: voitik@itmo.by.

Делендик Кирилл Иванович – ст. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kdendik@yahoo.com.

Колыга Наталья Владимировна – вед. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kolyago@hmti.ac.by.

Information about the authors

Voitik Olga L. – Senior researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: voitik@itmo.by.

Delendik Kirill I. – Senior researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kdendik@yahoo.com.

Kolyago Natalia V. – Leading researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kolyago@hmti.ac.by.